Proprietà ottiche di semiconduttori

Practically Needed End-Use Technologies: Information and Communication Technologies Other Special Applications

₽

Demands for Technical Capabilities and Systems: High Integration High Speed and Low Power Consumption Operation with Electric and Optical Signals

¥

Demands for Devices and Their Design: Scaling-Down Devices Minimization of Interconnections Effective Electric ↔ Optical Conversion

₽

Demands for Materials and Processing: Improving Existing Materials Novel Superb Materials Properties Artificial Multilayer and Other Structures Advance Growth and Processing Techniques

₽

Fundamental Underpinnings: New Physics of Materials and Devices New Device Concepts

Assorbimento di luce da parte di un semiconduttore



Rate di transizione a 0 K

La probabilità per unità di tempo di transizione tra due stati elettronici in un sistema qualsiasi:

$$\frac{1}{\tau_0} = \frac{2\pi}{\hbar} \rho \left| \left\langle f \left| H' \right| i \right\rangle \right|^2$$

Fermi Golden Rule

 $\left|i\right\rangle$ stato iniziale $\left|f\right\rangle$ stato finale

- H' perturbazione
- ho densità degli stati finali

Effetti della temperatura

- Lo stato di partenza deve essere pieno
- Lo stato di arrivo deve essere vuoto

$$\frac{1}{\tau_T} = \frac{1}{\tau_0} f(E_i) \cdot \left[1 - f(E_f)\right]$$

La dipendenza di $1/\tau_T$ dalle proprietà del materiale sono contenute in $1/\tau_0$

$$\frac{1}{\tau_0} = \frac{2\pi}{\hbar} \rho \left| \left\langle f \left| H' \right| i \right\rangle \right|^2$$

Transizioni per dipolo elettrico

$$\alpha^{3D}(\hbar\omega) = \frac{\pi e^2}{m_0^2 c n_r \varepsilon_0} \frac{\hbar}{\hbar\omega} \int \frac{2d^3k}{(8\pi)^3} \left| \vec{a} \cdot \vec{p}_{if} \right|^2 \delta\left(E_c\left(\vec{k}\right) - E_v\left(\vec{k}\right) - \hbar\omega \right)$$

- Devono valere i principi di conservazione di:
 - Energia $\longrightarrow E_c = E_v + \hbar \omega$
 - Impulso

$$k_e \approx \frac{2\pi}{a}$$
 $a \approx 5 \text{\AA}$
 $k_{ph} = \frac{2\pi}{\lambda}$ $\lambda \approx 800\text{-}1000 \text{ nm}$

 $\frac{k_{ph}}{k_{c}} \approx 5 \cdot 10^{-4}$

Conseguenze della conservazione dell'impulso

$\Delta k \approx 0 \Rightarrow$ Transizioni *verticali*



Facendo i conti

$$\alpha^{3D}(\hbar\omega) = 0 \qquad \hbar\omega < E_g$$

$$\alpha^{3D}(\hbar\omega) = \frac{\pi e^2}{m^2 c n_r \varepsilon_0} \frac{\hbar}{\hbar\omega} \left| \vec{a} \cdot \vec{p}_{if} \right|^2 N_{cv}(\hbar\omega) \quad \hbar\omega \ge E_g \qquad \approx \left(\hbar\omega - E_g \right)^{1/2}$$



Assorbimento del GaAs

Una vera struttura a bande



Diagramma a bande del Silicio





Assorbimento diretto per dipolo elettrico proibito per semiconduttori a Gap indiretta 11

Quanti sono i semiconduttori in natura?



Leghe

|||-V

||-V|

IV-IV

Qualche esempio

Elements	IV-IV	III-V	II-VI	IV-VI
	compounds	compounds	compounds	compounds
Si	SiC	AlAs	CdS	PbS
Ge		AlSb	CdSe	PbTe
		BN	CdTe	
		GaAs	ZnS	
		GaP	ZnSe	
		GaSb	ZnTe	
		InAs		
		InP		
		In Sb		

Table 4.2. Energy-Band Parameters for Si and Ge			
Group IV	Si	Ge	
Type of bandgap	Indirect	Indirect	
Lowest minima	Δ points	L points	
Degeneracy	6	4	
$E_{\pi}(eV)$	1.12	0.664	
my/m	0.98	1.64	

 m_t/m

 $m_{\rm hh}/m$

 $m_{\rm lh}/m$ $\Delta_{so}(eV)$ 0.19

0.50

0.16

0.044

Table 4.3.		
Energy-Band	Parameters for III-V	/ Compounds

0.44

0.28

0.29

0.082

The As Family	InAs	GaAs	AlAs	
Type of gap	Direct	Direct	Indirect	
Lowest minima	Γ point	Γ point	X points	
Eg (eV)	0.354	1.42	2.95	
m [*] _a /m	0.025	0.067	0.124	
m _{hh} /m	0.41	0.50	0.50	
m _h /m	0.26	0.07	0.26	
∆ _{so} (eV)	0.38	0.34	0.28	
The Sb Family	InSb	GaSb	AlSb	
Type of gap Lowest minima Eg (eV) m [*] _a /m	Direct Γ point 0.18 0.013	Direct F point 0.7 0.04	Indirect X points 2.22	
$\frac{m_{\rm hh}}{m_{\rm lh}}$	0.47	0.49	0.76	
$\frac{m_{\rm lh}}{m}$	0.015	0.076	0.15	
$\Delta_{\rm so}$ (eV)	0.81	0.34	0.29	







 $\vec{p}_{if} = \int \psi_f^*(\vec{r}) e\vec{r} \,\psi_i(\vec{r}) d\vec{r}$

Cosa succede se



In nessuna regione di spazio sia ψ_f che ψ_i hanno ampiezza non nulla(basso overlap)



La rate di transizione aumenta all'aumentare dell'integrale di sovrapposizione delle funzioni d'onda

Leghe

- Consentono di ampliare molto la famiglia dei semiconduttori
- Consentono una buona accordabilità (tuning) dell'Energy Gap

MA

Alcune leghe non sono stabili nel tempo Es In_xGa_{1-x}As (l'Indio diffonde e si aggrega in cluster)

Transizioni ottiche:effetto di T



Assorbimento del GaAs A bassa temperatura: -blueshift - compare un picco non previsto

Cosa abbiamo dimenticato?



L'interazione Coulombiana tra elettrone e lacuna modifica la densità degli stati



Eccitoni in 3D



$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m_e^*}\nabla_e^2 - \frac{\hbar^2}{2m_h^*}\nabla_h^2 - \frac{e^2}{4\pi\varepsilon|\vec{r_e} - \vec{r_h}|}\right]\psi_{exc} = E\psi_{exc}$$

Problema a due corpi. Effettuando le seguenti trasformazioni (riduzione al moto relativo ed al moto del centro di massa)



 $\begin{vmatrix} \vec{r} = \vec{r}_e - \vec{r} \\ \vec{k} = \frac{m_e^* \vec{k}_e + m_h^* \vec{k}_h}{*} \end{vmatrix} \qquad \longrightarrow \qquad H = \frac{\hbar^2 K^2}{2(m_e^* + m_h^*)} + \left(\frac{\hbar^2 k^2}{2m_r} - \frac{e^2}{4\pi\varepsilon|\vec{r}|}\right)$

Moto del centro di massa

$$\mathcal{V}_{CM} = e^{i\vec{K}\cdot\vec{L}}$$

Moto relativo del sistema e-h

$$\left(\frac{\hbar^2 k^2}{2m_r} - \frac{e^2}{4\pi\varepsilon|\vec{r}|}\right) F(\vec{r}) = EF(\vec{r})$$

La soluzione generale si può scrivere ϕ_e ϕ_h e-h stati in teoria di massa effettiva:

$$\Psi_{n,\vec{K}_{exc}} = e^{i\vec{K}\cdot\vec{R}}F_n(\vec{r})\phi_c(\vec{r}_e)\phi_v(\vec{r}_h)$$

Livelli energetici eccitonici:

$$E_{n,\vec{K}_{exc}} = E_n + \frac{\hbar^2 K_{exc}^2}{2(m_e^* + m_h^*)}$$

$$E_{n} = -\frac{m_{r}^{*}e^{4}}{2(4\pi\varepsilon)^{2}\hbar^{2}}\frac{1}{n^{2}} = \frac{R_{exc}}{n^{2}}$$



$$F_{100}(\vec{r}) = \frac{1}{\sqrt{\pi a_{exc}^3}} e^{-r/a_{exc}}$$
$$a_{exc} = \frac{\varepsilon m_0}{\varepsilon_0 m_r^*} a_0$$

La funzione d'onda eccitoniche sono di tipo idrogenoide e lo stato fondamentale è:



Gli eccitoni modificano la struttura a bande al di sotto della gap

 $E_n^{exc} = E_g - \frac{R_{exc}}{n^2}$

		-		
		Semicond.	R _{exc} (meV)	A _{exc} (nm)
\setminus /		GaAs	4.9	11.2
k _c		InP	5.1	11.3
E ↑ C-band	Optically	CdTe	11	1.22
$(k_e - k_h = K_{ex})$	E_g active states	ZnTe	13	1.15
$ \xrightarrow{L_g} \rightarrow \xrightarrow{k} \rightarrow$	\downarrow 0 K_{ex}	ZnSe	19.9	1.07
↓ Î		ZnS	29	1.07
V-band		ZnO(W)	59	
		CdSe(W)	15	
		CdS(W)	27	

Cosa succede dopo l'assorbimento





1) Regime coerente (0<t<200 fs) scattering e-e, h-h, e, h optical phonons 2) Regime non termico (t<2 ps) scattering e-h 3) Regime di eccitazione calda (1ps<t<100ps) scattering e,h-fononi acustici 4) Regime isotermico (t>100 ps) ricombinazione

Importanza degli eccitoni

2) l'elettrone e la lacuna sono legati

Alta sovrapposizione delle funzioni d'onda di elettrone e lacuna

Alta efficienza di emissione



Figure 3.24. Experimental values for the exciton coupling energy E_0 versus bandgap E

Lista dei desideri....

- Modulabilità della Energy Gap
- Emissione eccitonica a temperatura ambiente
- Alta efficienza di emissione (alto overlap delle funzioni d'onda di elettrone e lacuna)

Nanostrutture a confinamento quantistico Nobel per la Fisica 2000

"for basic work on information and communication technology"

"for developing semiconductor heterostructures used in high-speed- and opto-electronics" "for his part in the invention of the integrated circuit"





Principio di funzionamento



Buca rettangolare Stati quantizzati Energia dipendente da: larghezza della buca altezza della barriera

X



Cosa serve

Materiali

- Due semiconduttori:
- 1) Con Gap diversa
- 2) Chimicamente compatibili
- 3) Simile costante reticolare

Struttura

Buca di larghezza confrontabile con l'estensione delle funzioni d'onda eccitoniche Raggio di Bohr dell'eccitone GaAs=11 nm≈20 costanti reticolari



Figure 5. Energy gaps vs lattice constant for III–V Semiconductors. Lattice matched heterojunctions: Ge-GaAs–1959 (R. L. Anderson); AlGaAs–1967 (Zh. Alferov *et al.*, J. M. Woodall & H. S. Rupprecht); Quaternary HS (InGaAsP & AlGaAsSb): Proposal–1970 (Zh. Alferov *et al.*); First experiment–1972 (Antipas *et al.*)

Anni '70



Figure 6. Energy gaps vs lattice constants for semiconductors of IV elements, III–V and II(IV)–VI compounds and magnetic materials in parentheses. Lines connecting the semiconductors, solid for the III–V's and dotted for the others, indicate quantum heterostructures that have been investigated.

Tecniche di crescita epitassiali Metal-Organic Chemical Vapour Deposition



Molecular Beam Epitaxy (MBE)



Stato dell'arte



36
Quantum well singola: un po' di teoria



- •Approssimazione di funzione inviluppo e di massa effettiva
- •Struttura a bande
- •Formazione dell'offset
- •Struttura banda di valenza
- •Strutture strained
- •Eccitoni ed impurezze

L'equazione di Schroedinger è:

$$\left[\frac{-\hbar^2\nabla^2}{2m^*(z)} + V(z)\right]\psi(x, y, z) = \varepsilon_n\psi(x, y, z)$$

Dato che il moto nel piano x,y è libero, si fattorizza il problema (S è la superficie dell'interfaccia):

$$\left[\frac{-\hbar^2}{2m^*(z)}\frac{d^2}{dz^2}+V(z)\right]\chi(z)=\varepsilon_n\chi(z)$$

Le condizioni al contorno diventano:

$$\left|\frac{1}{m_B^*(z)}\frac{d\chi(z)}{dz}\right|_{z=0_b} = \frac{1}{m_W^*(z)}\frac{d\chi(z)}{dz}\Big|_{z=0_W}$$



$$\psi(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{S}} e^{ik_x x} e^{ik_y y} \chi(z)$$

$$\varepsilon(\vec{k}) = \varepsilon_n + \frac{\hbar^2 (k_x^2 + k_y^2)}{2m_{e,h}^*}$$

Densità degli stati per un gas elettronico bidimensionale (2D)

$$\varepsilon(\vec{k}) = \varepsilon_n + \frac{\hbar^2 (k_x^2 + k_y^2)}{2m_e^*}$$

Densità degli stati elettronici $\rho(\mathcal{E})$

Numero degli stati quantici in $dN = \rho(\varepsilon)d\varepsilon$ Numero degli stati quantici il un intervallo d ε intorno ad ε



$$\rho(\varepsilon)^{3D} = \left(\frac{m_e^*}{\hbar^2}\right)^{3/2} \frac{V}{\pi^2} \sqrt{2\varepsilon}$$

Densità degli stati elettronici nel caso 3D (Bulk)

Da cui segue la ben nota relazione:

 $\sum_{k_x,k_y} (\cdots) = \frac{L_x L_y}{(2\pi)^2} \iint dk_x dk_y (\cdots)$

$$\rho^{2D}(\varepsilon) = \frac{m_e^* L_x L_y}{\pi \hbar^2} \sum_n \int_0^\infty d\varepsilon_{\parallel} \delta(\varepsilon - \varepsilon_n - \varepsilon_{\parallel}) = \frac{Sm_e^*}{\pi \hbar^2} \sum_n \Theta(\varepsilon - \varepsilon_n)$$

Densità degli stati bidimensionale



Assorbimento in QW: esperimento



Assorbimento per un QW di 10 nm di GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As (a) ed In_{0.53}Ga_{0.47}As (b)



"Alloy broadening"

GalnAs/AllnAs Multiple quantum well. Il campione 5918 ha l'interfaccia intenzionalmente degradata.



Oltre la singela QW

В	W	В	W	В	W	В

Super-reticoli



Modulatori elettro-ottici

Funzioni d'onda per l'elettrone e la lacuna in due QW di GaAs con spessore diverso (3 nm e 10 nm) e per un campo pari a 10⁵ V/cm

Per una modulazione efficiente il valore ottimale per lo spessore della QW di GaAs è ~10 nm



Modulatore ottico basato sul QCSE





Figure 10.16: Measured polarization dependent transmittances in GaAs/AlGaAs (100 Å) multiquantum well structures when light is coming in the waveguide geometry. (a) Incident polarization parallel to the plane of the layers. (b) Incident polarization perpendicular to the plane of the layers. (After D.A.B. Miller, et al., *IEEE J. Quantum Electronics*, QE-22, 1816 (1986).)

Fili quantici 1D: funzioni d'onda e livelli energetici

$$V(x, y, z) = V(y, z) = V(x) + V(z)$$

Separazione di variabili

$$\psi(x, y, z) = e^{ik_x x} \chi(y, z)$$



$$\left[\frac{-\hbar^2}{2m^*}\left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right) + V(y,z)\right]\chi(y,z) = \varepsilon\chi(y,z)$$

L'energia totale dell'elettrone si può scrivere

$$E = \mathcal{E}_i + \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m^*}$$

Il più semplice potenziale è il potenziale rettangolare con barriera infinita:

$$V(y,z) = \begin{cases} 0 & 0 \le y \le L_y & 0 \le z \le L_z \\ \infty & y \le 0, z \le 0 & y \ge L_y, z \ge L_z \end{cases}$$

 $\chi(y,z) = \chi(y)_{n1} \chi(z)_{n2}$

Le soluzioni sono:

$$\chi(y)_{n1} = \sqrt{\frac{2}{L_y}} \sin\left(\frac{\pi y n_1}{L_y}\right) \quad \chi(z)_{n2} = \sqrt{\frac{2}{L_z}} \sin\left(\frac{\pi z n_2}{L_z}\right) \quad n_1, n_2 = 1, 2, 3..$$

$$\varepsilon_{n_1,n_2} = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^*} \left(\frac{n_1^2}{L_y^2} + \frac{n_2^2}{L_z^2} \right)$$

 $n_1, n_2 = 1, 2, 3...$



Potenziale parabolico

$$V(y,z) = V_1(y) + V_2(z), \quad V_1(y) = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 V_1}{\partial y^2}\right)_{y=0} y^2$$

Le soluzioni sono:

$$\chi_{n_1,n_2}(y,z) = \cos t \times e^{-\alpha^2 y^2} H_{n_1}(\alpha y) \sin\left(\frac{\pi z n_2}{L_z}\right)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{2}{m^*}} \left(\frac{\partial^2 V_1}{\partial y^2}\right)_{y=0} \qquad \alpha = \frac{m^* \omega}{\hbar} \quad H_n(y) = (-1)^n \frac{d^n}{dy^n} e^{-y^2}$$

$$\mathcal{E}_{n_1,n_2} = \hbar \omega \left(n_1 + \frac{1}{2} \right) + \frac{\hbar^2 \pi^2 n_2^2}{2m^* L_z^2}$$

$$n_1, n_2 = 1, 2, 3...$$





Densità degli stati unodimensionale, 1D DOS

$$\rho(\varepsilon) = \sum_{v} \delta(\varepsilon - \varepsilon_{v}) \to \rho(E) = \sum_{n_{1}, n_{2}} \rho_{n_{1}, n_{2}}(E)$$

$$\rho_{n_1,n_2}(E) = 2 \sum_{n_1,n_2} \delta \left(E - \varepsilon_{n_1,n_2} - \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m^*} \right)$$

$$\rho_{n_1,n_2}(E) = \frac{2L_x}{\pi} \int_0^\infty dk_x \delta\left(E - \varepsilon_{n_1,n_2} - \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m^*}\right)$$
$$= \frac{L_x}{\pi} \sqrt{\frac{2m^*}{\hbar^2}} \frac{1}{\sqrt{E - \varepsilon_{n_1,n_2}}} \Theta(E - \varepsilon_{n_1,n_2})$$

$$\upsilon = \left\{ s, n_1, n_2 \vec{k}_x \right\} \qquad s = \pm 1/2$$







QW(100)

















- Fotogenerazione nel continuo e rapido rilassamento (*G*)
- 2. Ricombinazione radiativa e non-radiative (R_i)
- 3. Thermal escape (*E*)
- 4. Diffusione dei portatori fuggiti termicamente dal livello e_i e catturati nel livello e_i ($D_{i,i}$)

$$\begin{aligned} \frac{dn_1}{dt} &= G_1 - R_1 - E_1 \\ \frac{dn_2}{dt} &= G_2 - R_2 - E_2 + D_{1,2} \\ \frac{dn_3}{dt} &= G_3 - R_3 - E_3 + D_{2,3} + D_{1,3} \end{aligned}$$

$$R_{i} = n_{i} \left(\frac{1}{\tau_{i}^{Rad}} + \frac{1}{\tau_{i}^{NonRad}} \right)$$
$$E_{i} = \frac{n_{i}}{\tau_{i}^{0}} e^{-E_{0}/kT}$$

Allo stato stazionario:



x=0.1free-carriers behaviourx=0.15-0.20excitons behaviour

Dispositivo laser basato su quantum wires



Fig. 1. Schematic of the quantum wire lasers studied in this work and TEM cross-section of the active layer showing three vertically stacked wires. The inset shows the light current characteristic at 10 K for the x = 0.10 quantum wire device.



Fig. 2. Electroluminescence spectra above threshold from the x = 0.10 device at different temperatures.

Punti quantici 0D. Funzioni d'onda e livelli energetici

Il più semplice potenziale è la **buca rettangolare a** pareti impenetrabili:

$$V(x, y, z) = \begin{cases} 0 & 0 \le x \le L_{x,} 0 \le y \le L_{y,} 0 \le z \le L_{z} \\ \infty & altrimenti \end{cases}$$



$$\psi_{n_1,n_2,n_3}(x,y,z) = \sqrt{\frac{8}{L_x L_y L_z}} \sin\left(\frac{\pi x n_1}{L_x}\right) \sin\left(\frac{\pi y n_1}{\frac{\pi y n_2}{2}}\right) \sin\left(\frac{\pi z n_1}{L_z}\right)$$

$$\mathcal{E}_{n_1,n_2,n_3} = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^*} \left(\frac{n_1^2}{L_x^2} + \frac{n_2^2}{L_y^2} + \frac{n_3^2}{L_z^2} \right)$$

$$n_1, n_2, n_3 = 1, 2, 3...$$

Livelli tre volte degeneri. Funzioni localizzate nelle tre direzioni



Atomi artificiali autoassemblati



Quantum dots epitassiali di InGaAs/GaAs











Spettri di emissione



1.3 µm QD Electronic Structure





10.00 Al_{0.3}Ga_{0.7}As **GaAs substrate** G In_{o 1}Ga_o X A. VQWR



FIG. 1. (Color online) Top-view scanning electron microscope image of prepatterned GaAs (111)B substrate with a 2- μ m size hexagonal "defect and an isolated pyramidal recess at its center.





FIG. 1. Photoluminescence spectra of InGaAs quantum dots excited with an argon laser. For $I_{exc} = 75 \text{ W/cm}^2$ we estimate, on the basis of peak intensities, that there are approximately 6–8 electrons and 6–8 holes in a quantum dot. Inset: schematic diagram of the strain-induced confining potential of the dots.

Microscopio ottico: principi e limite di diffrazione



 S_1 — obiettivo; S_2 — oculare; AB — oggetto in esamc; A'B' — immagine reale fornita dall'oblettivo; A'B'' — immagine virtuale vista con l'oculare.





La μ PL, utilizza un microscopio ottico per eccitare una ristretta area del campione, la cui dimensione laterale risulta essere dell'ordine del μ m

I fattori limitanti della risoluzione sono:

1.II limite di diffrazione2.La diffusione dei portatori

The Diffraction Limit

Ernst Karl Abbe (1840 – 1905)

- foundation member of Zeiss-works
- social reformer
- physicist:
 - 1873 theory on microscopes and microscopic perception:





- n = index of refraction of embedding medium
- Θ = acceptance angle of objective
- n sin Θ = numeric aperture

W. Gutmannsbauer, Institute of Physics, University of Basel
Come superare il limite di diffrazione $\Delta x \approx \lambda / 2$?



Campo lontano: $a << \lambda << r$ campo radiante

La luce diffusa dal campione posto nella zona di campo prossimo (ad una distanza dall'apertura minore di λ), contiene delle informazioni la cui risoluzione spaziale e' dell'ordine di grandezza dell'apertura stessa.





La risoluzione laterale raggiunta dal microscopio ottico in campo vicino è circa uguale all'apertura della fibra ottica: 50-100 nm

74



InGaAs/GaAs Quantum dots: Sample Structure





Sample regions:

- A: Several *active* QDs, density 4×10¹⁰ cm⁻²
- B: Removed cap layer, not active QDs

C: A few active QDs

The QDs *do not emit* when cap layer is *absent* 76

Macro vs. SNOM photoluminescence

PL Intensity (arb. units)



77

Single QD PL: dependence on power

02qct5n+



78



FIG. 1. (a) Photoluminescence spectra of a single In_xGa_{1-x}As quantum dot, excited by a 514.5 nm line of an Argon laser at a sample temperature of 35 K, as a function of the excitation intensity; (b) calculated luminescence spectra for the recombination of neutral (gray filled lines) and negatively charged (black lines) multiexciton complexes.

Confronto tra teoria ed esperimento

- 1. Presenza di shell tipo atomico
- 2. Saturazione della shell s
- *3. Presenza di complessi neutri e complessi carichi negativamente*
- 4. FWHM = 1.5 meV (broadening da interazione con LO)
- 5. Presenza di coppia di QDs piu' piccoli

Quadratic QCSE in InAs/GaAs QDs

Appl. Phys. Lett., Vol. 78, No. 12, 19 March 2001



FIG. 2. (a) ER spectra of QDs for different reversed bias (V_R) measured at T=10 K. (b) The electric-field-dependent transition energies for the ground state (E_0) and the excited states $(E_1 \text{ and } E_2)$. The arrows indicate the center of the fitted parabola of Eq. (1).

Effetto del Campo elettrico sull'intensita della fotocorrente

Fry et al. 4345 1200 800 --2.5V/-2V/ 800 400 0.5V 600 +1\ Photocurrent (pA) 1.46 1.48 1.40 1.42 1.44 400 31 200 -2V 0 - - - -1.25 1.30 1.15 1.10 1.20 Energy (eV)

FIG. 2. Photocurrent spectra as a function of bias at 10 K. Quantum-dot features are observed for reverse biases between -3 and -6 V. The inset shows photocurrent from the two-dimensional wetting-layer transition, observed to its full intensity at biases of only ~ -0.5 V.

Fotocorrente vs luminescenza



Fotoluminescenza e Fotocorrente su singolo InAs/GaAs QDs



FIG. 1. Schematic band structure of the devices investigated for V_{app} such that the QD's are uncharged with excess holes. The main carrier dynamical processes are shown due to radiative recombination (R_{PL}) and carrier escape denoted by R_{PL} and $R_{e/h}$, respectively.

R. OULTON et al.



FIG. 2. Charge neutral single exciton emission (X_{PL}^0) and absorption (X_{PC}^0) spectra obtained from an individual quantum dot as a function of applied bias in the range $(+0.4 \le V_{app} \le +2.6 \text{ V})$ corresponding to axial electric fields ranging from 30 $\le F(\text{kV cm}^{-1}) \le 160$. The charging of the QD with excess holes is clearly observed for $V_{app} < 0.6 \text{ V}$, marked by the appearance of additional lines in the emission spectrum (X_{PL}^{n+}) . The broadening of X_{PL}^0 is clearly evident for $F \ge 100 \text{ kV cm}^{-1}$ as $R_e \ge R_{PL}$.

Mapping delle funzioni d'onda





FIG. 1. (a) Sketch of STS measurement of the sample with freestanding InAs QDs; tunneling path *I* along *z* is indicated; (b) band profile along the *z* direction marked in (a) as calculated with a 1D-Poisson solver [14], $V_{\text{sample}} = 1.05 \text{ V}$, CB: conduction band, VB: valence band; a confined QD state is marked as a full black line; (c) constant-current image of the InAs-QD sample, $V_{\text{sample}} = 3 \text{ V}$, I = 70 pA; left inset: 3D representation of a typical QD with the [110] direction marked; central inset: wetting layer with atomic resolution; (2 × 4) unit cell (white rectangle) is marked.



FIG. 2. Single QD, W tip: (a) constant-current image, $V_{\text{sample}} = 1.7 \text{ V}$, I = 50 pA, height H and crystallographic directions marked; (b) I(V) curves recorded on the QD (black line) and on the wetting layer (grey line), $V_{\text{stab}} = 1.6 \text{ V}$, $I_{\text{stab}} = 50 \text{ pA}$; (c) dI/dV curves recorded simultaneously with (b), $V_{\text{mod}} = 28 \text{ mV}$; (d) dI/dV curves recorded at different positions above the QD as marked in (a); (e),(f) spatially resolved dI/dV data at $V_{\text{sample}} = 0.89 \text{ V}$ and $V_{\text{sample}} = 1.14 \text{ V}$, respectively; all data in Fig. 2 are raw data.



Applicazioni

Celle solari

Applicazioni spaziali sovietiche dal 1975



Figure 9. Evolution of the threshold current of semiconductor lasers.

There's a plenty of room at the bottom



Il testo integrale del seminario si trova al link http://www.marco.anni.unile.it/quote.htm

Eterostrutture epitassiali:stato dell'arte

Quantum wells



Diverse applicazioni commerciali

Quantum wires



Instabili nel tempo

Crescita complessa e non compensata dai vantaggi

Quantum dot



Studi fondamentali quasi finiti Fase di sviluppo dei dispositivi

Stato attuale



Oltre l'MOCVD e l'MBE



Prezzo 18k€, circa 500 volte meno di un MBE o un MOCVD



Wagner and Ellis (1964)



ZnO nanowires

P. Yang et al (2002)



InAs/InP nanowires

L. Samuelson et al (2002)

Nanostrutture UV

- Emettitori nell'UV utili per Optical Data Storage (CD e DVD)
- ZnO non tossico
- Energia di legame eccitone 60 meV (GaN 25 meV ZnSe 22 meV)

Risultati tipici





A. Cretì et al, unpublished

Nanolaser a ZnO

- I nanocristalli di ZnO hanno forma regolare
- nd> λ_{em}

possibile utilizzo come nano-risuonatori LASER

Nano-risuonatori



FIG. 1. (Color online) As a concrete example of a nanorod laser the intensity distribution of all guided modes of a waveguide with a 300 nm diameter at a vacuum wavelength of 370 nm is shown.

Nano-LASER



Fig. 1. (A through E) SEM images of ZnO nanowire arrays grown on sapphire substrates. A top view of the well-faceted hexagonal nanowire tips is shown in (E). (F) High-resolution TEM image of an individual ZnO nanowire showing its <0001> growth direction. For the nanowire growth, clean (110) sapphire substrates were coated with a 10 to 35 Å thick layer of Au, with or without using TEM grids as shadow masks (micro contact printing of thiols on Au followed by selective etching has also been used to create the Au pattern).

An equal amount of ZnO powder and graphite powder were ground and transferred to an alumina boat. The Au-coated sapphire substrates were typically placed 0.5 to 2.5 cm from the center of the boat. The starting materials and the substrates were then heated up to 880° to 905°C in an Ar flow. Zn vapor is generated by carbothermal reduction of ZnO and transported to the substrates where ZnO nanowires grow. The growth generally took place within 2 to 10 min (15).

Science 2001



Nano belt laser









Sensori di gas



R. Rella, M. Lomascolo, F. Quaranta CNR-IMM Lecce

Atomi artificiali sintetizzati chimicamente



Spettri di emissione



Nanocrystals absorb light then re-emit the light in a different color – the size of the nanocrystal (at the Angstrom scale) determines the color

Six different quantum dot solutions are shown excited with a long wave UV lamp

Oltre i semiconduttori



Se le nostre piccole menti, per qualche convenienza, dividono ... questo universo, in parti - fisica, biologia, geologia, astronomia, psicologia, e così via- ricordatevi che la Natura questo non lo sa! (Richard Feynmann)